

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 169 (2018)

Heft: 3

Artikel: Quel avenir pour le sapin blanc en Suisse sous les effets des changements climatiques?

Autor: Vitasse, Yann / Rebetez, Martine / Augustin, Sabine

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097381>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Quel avenir pour le sapin blanc en Suisse sous les effets des changements climatiques?

Yann Vitasse Université de Neuchâtel (CH)*, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (CH)
Martine Rebetez Université de Neuchâtel (CH), Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (CH)
Sabine Augustin Office fédéral de l'environnement (CH)
Peter Brang Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (CH)

Quel avenir pour le sapin blanc en Suisse sous les effets des changements climatiques?

Les forestiers de nombreux pays européens recherchent actuellement les essences forestières ou les provenances les mieux adaptées au climat futur qui sera beaucoup plus chaud avec des sécheresses estivales plus marquées qu'aujourd'hui. Bien qu'il soit désormais évident que certaines espèces d'arbres vont souffrir davantage que d'autres dans les prochaines décennies, l'avenir du sapin blanc (*Abies alba* Mill.) reste incertain, car des résultats contradictoires ont été publiés concernant sa capacité à endurer les changements climatiques attendus. D'un côté, les modèles statistiques basés sur la répartition actuelle de l'espèce prédisent un fort déclin de sa répartition d'ici à la fin du siècle. De l'autre, les études paléoécologiques révèlent que cette espèce était présente dans un climat plus chaud et probablement plus sec qu'aujourd'hui, suggérant un fort potentiel d'adaptation aux changements climatiques à venir. Cette synthèse bibliographique montre que cette espèce pourrait effectivement se développer dans des conditions plus chaudes à condition que les précipitations restent suffisantes, ce qui, selon les modèles climatiques, devrait être le cas pour la plupart des régions en Suisse d'ici à la fin du siècle. De plus, les études dendroécologiques ont montré une plus forte résistance et résilience du sapin blanc par rapport à l'épicéa face aux sécheresses, suggérant que cette espèce devrait être favorisée par les forestiers. La plus grande menace actuelle pour le sapin est sans doute l'abrutissement par les ongulés qui peut mettre en péril sa régénération et qui devrait donc être maîtrisé, si l'on veut augmenter la proportion de sapin dans les forêts mixtes de Suisse.

Keywords: *Abies alba*, climate change, drought response, paleoecology, dendroecology, ecophysiology, provenance trials, silver fir

doi: 10.3188/szf.2018.0131

* Institut de géographie, Espace Louis-Agassiz 1, CH-2000 Neuchâtel, courriel yann.vitasse@wsl.ch

En Europe, les effets du changement climatique se font de plus en plus ressentir sur les essences forestières qui doivent faire face à un climat toujours plus chaud avec des sécheresses estivales plus fréquentes et plus marquées. L'avenir de certaines espèces reste incertain en raison d'un manque de connaissances concernant leurs exigences écologiques. La répartition actuelle du sapin blanc (*Abies alba* Mill.) a été fortement modifiée par l'action de l'homme depuis des millénaires, notamment à basse altitude, et ne reflète donc plus ses exigences écologiques (Tinner et al 2013). Ainsi, les modèles de niche écologique basés sur la répartition actuelle de l'espèce en relation avec les paramètres climatiques prédisent une régression forte du sapin dans les décennies à venir pour la Suisse et de manière générale

pour l'Europe centrale (Maiorano et al 2013, Zimmermann et al 2016). A l'inverse, les études paléoécologiques ainsi que les modèles plus mécanistiques et dynamiques qui tiennent compte des traits fonctionnels des espèces et qui intègrent des perturbations biotiques ou abiotiques comme la fréquence des incendies, suggèrent que cette essence pourrait avoir un fort potentiel pour faire face aux changements climatiques attendus voire même qu'elle pourrait s'épanouir davantage dans certaines régions de Suisse dépourvues de déficit hydrique estival marqué comme au Tessin (Henne et al 2015, Tinner et al 2013). Cet article a pour objectif de faire un bilan des connaissances acquises dans différentes disciplines afin de mieux comprendre ces résultats contradictoires. Cette synthèse vise ainsi à évaluer dans

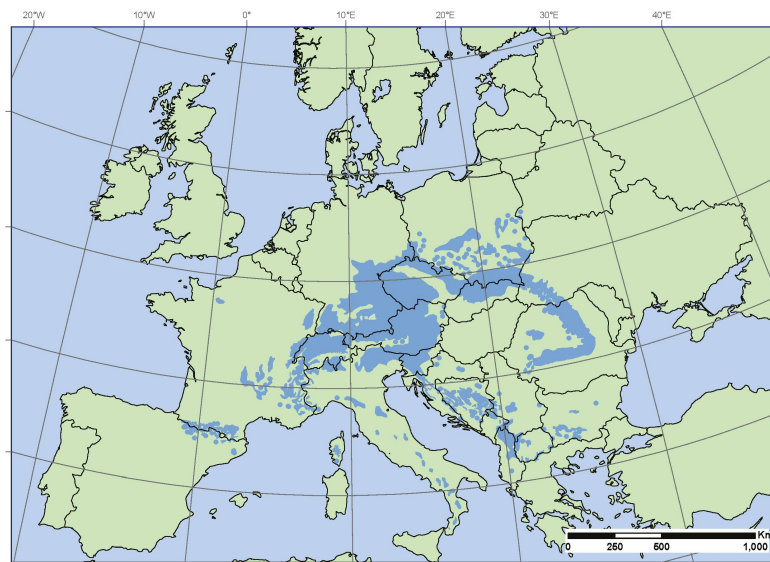


Fig. 1 Aire de répartition actuelle du sapin blanc (à gauche). Photo d'un jeune sapin (à droite). Carte: Euforgen (2009). Photo: Ulrich Wasem WSL

quelle mesure cette espèce pourrait se développer dans des conditions plus chaudes qu'aujourd'hui et faire face à des sécheresses estivales accrues. La première partie se concentre sur la répartition actuelle du sapin largement façonnée par l'homme. La deuxième partie synthétise les connaissances concernant les exigences écologiques du sapin et sa capacité à faire face aux variations climatiques en se basant sur les observations, les études dendroécologiques, les études expérimentales et les tests de provenance. Enfin la dernière partie fait le point sur le potentiel du sapin à faire face aux changements climatiques et sur les pratiques sylvicoles qui permettent de favoriser cette espèce emblématique au sein des forêts suisses.

Répartition actuelle et passée du sapin blanc

Répartition actuelle

L'aire de répartition actuelle du sapin reflète à la fois l'histoire dynamique des migrations et régressions qui ont eu lieu pendant les périodes glaciaires et interglaciaires du Pléistocène et l'influence humaine pendant l'Holocène. L'aire actuelle se concentre principalement dans les régions montagneuses d'Europe centrale et méridionale avec une limite Sud vers les latitudes 38–40° N, à la frontière Nord de la Grèce ou au sud de l'Italie, et une limite Nord vers la latitude 52° N en Pologne (figure 1). D'ouest en est, le sapin se retrouve de la longitude 1° O dans les Pyrénées occidentales à la longitude 27° E en Roumanie et en Bulgarie (figure 1). Le sapin est naturellement présent dès 135 m d'altitude, en Pologne, jusqu'à des altitudes légèrement inférieures à la limite altitudinale des arbres, c'est à dire à environ 2000 m dans les Alpes suisses (Vitasse et al 2012).

A l'intérieur de cette vaste aire de répartition, le sapin est absent ou peu abondant dans les zones sèches de basse altitude comme dans la plaine hongroise (figure 1) ainsi que dans les vallées les plus continentales des Alpes comme dans les Grisons. En Suisse, le sapin reste assez abondant de part et d'autre du Rhône malgré un climat sec. Il recouvre par exemple des surfaces importantes au-dessus de Martigny et de Saxon, sur les trois versants du Catogne mais aussi entre Sierre et Viège en rive gauche et forme même des peuplements presque purs, par endroits. Il est cependant plus présent au nord des Alpes, sur le Plateau et dans la région biogéographique du Jura où il représente plus de 16%, 18% et 23% du volume de bois, respectivement (figure 2). La

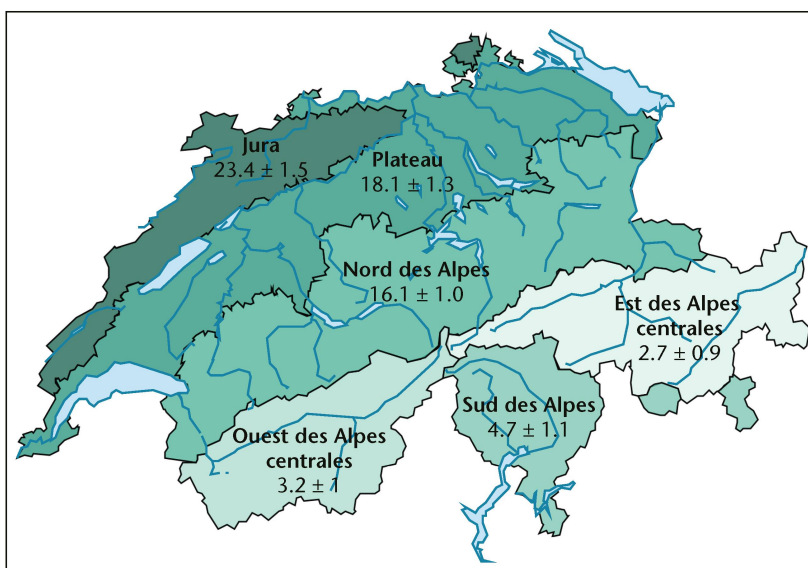


Fig. 2 Proportion du volume sur pied (% , individus avec DHP ≥ 12 cm) représenté par le sapin dans les différentes régions biogéographiques de Suisse. La valeur pour la Suisse entière s'élève à $14.9 \pm 0.6\%$ (données de l'Inventaire forestier national, Abegg et al 2014).



Fig. 3 Jeune sapin abrouiti par un chamois (à gauche) et dégâts liés à l'abrouitissement par les ongulés qui ont abîmé les pousses terminales et latérales (à droite). Photo: Ulrich Wasem, WSL

forte fragmentation de l'aire de répartition du sapin (figure 1) reflète en partie les perturbations humaines importantes au cours de l'Holocène. En Suisse, le sapin se trouve principalement à l'étage montagnard avec environ 70% des individus entre 600 et 1200 m d'altitude (Abegg et al 2014). Sa croissance est optimale entre 900 et 1400 m (Lingg 1986), mais il est également très présent aux altitudes les plus basses, notamment sur le Plateau suisse (figure 2). Au sein de cette répartition altitudinale, il est souvent mélangé avec le hêtre et l'épicéa aux altitudes les plus basses et les plus hautes, respectivement.

Influence humaine sur la répartition actuelle

Les études palynologiques suggèrent que le sapin était présent en abondance dans les forêts de basse altitude dans les Alpes du sud entre 9000 et 7000 avant notre temps (BP; Henne et al 2013, Ruosch et al 2016, Tinner et al 1999), suite à une recolonisation rapide via la région des Apennins. Une forte augmentation de l'humidité atmosphérique à partir de 8200 BP a sans doute contribué à l'expansion de cette espèce (Tinner & Lotter 2006). Les populations de sapin de basse altitude ont ensuite considérablement diminué entre 7000 et 6000 BP, si bien que certains auteurs parlent même d'une extinction régionale de l'espèce (Wick & Möhl 2006). Le développement de l'agriculture, l'exploitation du bois et l'augmentation de la fréquence des incendies causés par l'homme ont été proposés comme facteurs majeurs pour expliquer le déclin du sapin au cours de cette période (Conedera et al 2017, Tinner et al 1999). Ce déclin s'est poursuivi pour les mêmes raisons jusqu'à environ 2000 BP (Colombaroli et al 2007). Plus tard, les changements intensifs de l'utilisation des terres, la conversion de la forêt en terres agricoles et l'extraction massive de la forêt se sont poursuivis depuis le Moyen Age jusqu'au milieu du XIX^e siècle. En outre, à partir du XVIII^e siècle, l'épicéa (*Picea abies* [L.] H. Karst.) et les pins (*Pinus* sp.)

ont été largement plantés ou favorisés par rapport au sapin pour augmenter la production de bois en Europe centrale, Suisse incluse (Bürgi & Schuler 2003). Une sylviculture utilisant des coupes rases était aussi au détriment du sapin (Eichenseer 1997) et l'utilisation du sapin dans les reforestations des Préalpes suisses se soldait souvent par un échec (Ettlinger 1976). De plus, les forestiers ont souvent favorisé l'épicéa dans les éclaircies, car son bois est plus précieux. L'expansion actuelle du sapin vers de plus hautes altitudes pourrait être liée à l'abandon croissant des pâturages et terres agricoles (Carcaillet & Muller 2005, Chauchard et al 2010). De plus, jusqu'au milieu du XX^e siècle dans les Alpes et le Jura suisse, le parcours du bétail, chèvres et moutons passait traditionnellement par les forêts dans les territoires communaux (majoritaires), causant d'immenses dégâts pour la régénération des diverses essences forestières (Frey 2003), en particulier chez les espèces les plus appétentes comme le sapin très sensible à l'abrouitissement au stade juvénile (figure 3; Kupferschmid et al 2014). Même si la vigueur du sapin semble actuellement croître dans de nombreuses régions d'Europe centrale depuis les années 1990 (Büntgen et al 2014), il existe des régions où les populations de sapin semblent toujours localement régresser comme dans le nord des Carpates, en Slovaquie et en Croatie, probablement en raison de la concurrence croissante du hêtre et de la pression d'abrouitissement causée par les ongulés (Ficko et al 2016, Vrska et al 2009).

Autoécologie du sapin blanc basée sur sa répartition actuelle

Le sapin se développe généralement dans une large gamme de températures (température annuelle de ~ 7 à 13 °C ou température estivale de juin à août de ~ 14 à 19 °C) mais se trouve principalement dans les zones où les précipitations annuelles dépassent 800–1000 mm (Aussenac 2002, Gomez 2012). Il est considéré comme sensible à la sécheresse à basse al-

titude ou sur des sols ayant une mauvaise rétention d'eau comme des sols superficiels calcaires. En fait, les études écophysologiques mettent en évidence l'importance de la disponibilité de l'eau pour cette espèce, en particulier l'humidité atmosphérique, indépendamment des conditions de températures (Guicherd 1994, Rohner & Thürig 2015). Il peut se développer dans divers types de sols, de pH acide à neutre, et ayant une disponibilité en nutriments faible à riche. Il préfère néanmoins les sols humides et profonds qui ne se dessèchent pas facilement. Il est même capable de s'enraciner sur des sols argileux compacts faiblement oxygénés (Mauri et al 2016, Savill et al 2016). Il est très sensible à la pollution atmosphérique et en particulier au dioxyde de soufre, ce qui lui a causé d'importants dégâts depuis les années 1950 jusqu'au début des années 1980 quand le dioxyde de soufre avait atteint des concentrations très fortes (Kandler & Innes 1995, Schütt & Cowling 1985). Ces dégâts ont été observés dans toutes les régions où la concentration en dioxyde de soufre était forte avec d'importantes conséquences pour la croissance et mortalité du sapin (Elling et al 2012). Le sapin est également sensible à l'attaque du scolyte curvidenté appelé aussi «rongeur du sapin blanc» (*Pityokteines curvidens*), en particulier les arbres les plus vieux ou affaiblis, provoquant en peu de temps le jaunissement, puis le rougissement de l'arbre et finalement sa mort. Cet insecte présent en Suisse a vu ses populations augmenter sensiblement dans les

sapinières du pays suite aux sécheresses marquées de 1947–1949 (Maksymov 1950) et de 2003 (OFEP 2005). Le sapin est aussi fréquemment parasité par le gui, en particulier les arbres dominants, ce qui réduit de manière significative sa croissance (Durand-Gillmann et al 2014).

Les principaux facteurs environnementaux supposés limiter sa distribution sont l'humidité insuffisante, surtout pendant la saison de croissance, et les températures extrêmement basses en hiver (Mauri et al 2016). Il est cependant assez résistant aux températures froides en hiver, jusqu'à environ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Savill et al 2016), alors qu'il est sensible au gel printanier qui peut limiter la survie des semis (Aussenac 2002). En outre, à l'instar de toutes les essences sempervirentes, des périodes chaudes en hiver peuvent l'affecter lorsqu'elles se produisent pendant une période sèche sur un sol gelé, car la photosynthèse s'active alors que l'eau ne peut être fournie par les racines, augmentant le risque d'embolie des vaisseaux (Engesser et al 2002). Le système racinaire profond (racine pivot) permet aux arbres adultes de faire face aux conditions sèches en extrayant la réserve d'eau profonde, mais les juvéniles sont plus sensibles au stress hydrique et sont par conséquent moins vulnérables lorsqu'ils se développent sous couvert forestier qui tempère les variations climatiques et augmente l'humidité de l'air (Aussenac 2002). C'est une espèce très tolérante à l'ombre qui, contrairement au pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et dans une moindre



Fig. 4 Forte régénération du sapin blanc dans une hêtraie du Parc naturel régional du Doubs: la Haute Côte (Jura) à 670 m d'altitude. Photo: Ulrich Wasem, WSL

mesure à l'épicéa, est favorisée par un certain ombrage de la canopée dans sa phase de recrutement, car cela limite la concurrence avec les autres espèces (figure 4). Les jeunes plantules de sapin sont en revanche très sensibles à l'abroustissement par les grands herbivores qui peuvent mettre en péril la régénération (Kupferschmid & Brang 2010, Kupferschmid & Bugmann 2013).

Sensibilité de l'espèce aux événements climatiques extrêmes

Apports des études dendroécologiques

Les études dendroécologiques permettent de mieux comprendre la relation entre la croissance et les facteurs climatiques ainsi que la résistance (amplitude de la réduction de croissance durant l'année de l'évènement extrême) et résilience (capacité à retrouver une croissance équivalente à la période précédente) face à des événements climatiques extrêmes comme par exemple la sécheresse et canicule de l'été 2003. Depuis les années 1980, marquées par un réchauffement intense, des résultats contrastés ont été rapportés concernant la croissance selon la localisation des peuplements de sapin. La performance du sapin a augmenté dans les régions centrales de son aire de répartition, où le climat s'est réchauffé, mais où les précipitations sont restées inchangées voire ont augmenté, alors qu'elle a diminué dans les régions les plus méridionales, devenues de plus en plus arides. Par exemple, un taux de croissance exceptionnellement élevé a été observé en Europe centrale, mais aussi dans le centre et le nord de l'Italie. Cette tendance s'est encore accentuée après 2000 (Bosela et al 2018, Büntgen et al 2014). A l'inverse, une diminution de la croissance et de la vitalité a été observée depuis les années 1980 au sud de l'aire de répartition, dans les Pyrénées espagnoles et la Calabre (Carrer et al 2010, Gazol et al 2015). La croissance accélérée détectée depuis les années 1980 au cœur de son aire de répartition pourrait être la conséquence de la diminution de la pollution atmosphérique (en particulier du dioxyde de soufre), du réchauffement de la température de l'air avec des précipitations constantes, et/ou de l'augmentation des dépôts azotés agissant comme fertilisant (Büntgen et al 2014, Elling et al 2009). Les concentrations actuelles en CO₂ ont en revanche atteint un niveau tel que leur augmentation ne semble plus affecter la croissance des arbres (Körner et al 2005). De même, l'effet positif des dépôts azotés sur la croissance du sapin semble s'atténuer, voire s'inverser (Rohner & Thürig 2015). La diminution de la vitalité des populations des régions méridionales est probablement la conséquence d'une accumulation d'années sèches et chaudes qui ont suivi la canicule exceptionnelle de l'été 2003 (Macias et al 2006).

En Suisse et dans les régions voisines, le contrôle climatique de la croissance du sapin varie fortement selon l'altitude et les propriétés édaphiques de la station (Rohner et al 2016). En général, à des altitudes basses (<1000 m) dans la partie centrale de son aire de répartition, la croissance du sapin est négativement affectée par les températures de la saison de croissance précédente et dans une moindre mesure par celles de la saison de croissance actuelle. La croissance du sapin est également favorisée par les précipitations qui ont lieu au cours de la saison de croissance, en particulier au printemps, et négativement affectée par une sécheresse au cours de la saison de croissance précédente. Ceci a été démontré par des études en Forêt-Noire (van der Maaten-Theunissen et al 2012), dans les Vosges et le Jura à l'est de la France et au nord-ouest de la Suisse (Rolland et al 1999), dans le sud-est de la France (Lebourgeois et al 2013) et au centre de l'Italie (Mazza et al 2014). A des altitudes plus élevées, sa croissance répond généralement positivement aux températures de fin d'hiver et de début de printemps et n'est pas affectée par les variations de précipitations (Rolland et al 1999, van der Maaten-Theunissen et al 2012). Même si les sécheresses estivales réduisent la croissance du sapin, il semblerait que cet impact soit moins marqué que chez d'autres essences forestières. Par exemple, l'épicéa qui croît fréquemment aux côtés du sapin s'est révélé être plus sensible aux sécheresses estivales, indépendamment de l'altitude, dans le sud-ouest de l'Allemagne (van der Maaten-Theunissen et al 2012) ou dans les Alpes françaises (Desplanque et al 1998). De manière similaire, des suivis à long terme de la croissance des arbres conduits en Suisse, au sud de l'Allemagne, au sud de la France et en Europe centrale montrent que le sapin est plus résistant aux sécheresses extrêmes que l'épicéa, le mélèze et le hêtre (Caillieret & Hendrik 2011, Rothe et al 2011, Zang et al 2014, Zingg & Bürgi 2008) et aussi résistant que le sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*; Vitali et al 2017). Trois éléments pourraient expliquer la bonne résistance du sapin blanc à la sécheresse. Premièrement, la fin de la période de croissance du sapin se produit tôt dans la saison, habituellement au début du mois de juillet alors que les sécheresses les plus fortes ont généralement lieu pendant les mois de juillet et août (Aussenac 2002). Deuxièmement, le sapin pousse souvent sur des sols profonds et son système racinaire en pivot lui permet de puiser l'eau très profondément, contrairement à l'épicéa et dans une moindre mesure au hêtre (Stokes et al 2007). Troisièmement, cette espèce contrôle efficacement sa transpiration via la fermeture rapide de ses stomates lors de sécheresses sévères (Aussenac 2002) ou d'une augmentation de la sécheresse de l'air, mesurée en déficit de pression de vapeur (Guicherd 1994, Nourtier et al 2014, Rohner & Thürig 2015). Cette réponse rapide de la ferme-

ture stomatique à la sécheresse de l'air ou à un stress hydrique du sol est qualifiée de «stratégie d'évitement» de la sécheresse. Ainsi le sapin peut potentiellement endurer d'importantes sécheresses lorsqu'elles sont occasionnelles, mais a besoin sur le long terme d'une hygrométrie élevée pour effectuer sa photosynthèse et donc pour croître. C'est sans doute pour cette raison que cette espèce affectionne particulièrement les versants nord à forte humidité atmosphérique, en particulier en marge sud de sa répartition.

Apport des observations de terrain et de l'Inventaire forestier national suisse

Un rajeunissement du sapin est à l'heure actuelle observé dans les vallées pourtant sèches et/ou en exposition sud dans les Alpes françaises intérieures (Carcaillet & Muller 2005). Dans la région du Valais en Suisse, les forestiers constatent actuellement un rajeunissement du sapin sous couvert forestier même aux altitudes les plus basses dans des régions pourtant sèches, à condition que la pression d'abrutissement des ongulées soit faible. En revanche, au sud du massif du Jura, en particulier dans le district de Neuchâtel, les forestiers ont constaté des dépérissements récents du sapin aux altitudes les plus basses suite aux sécheresses estivales de 2003, 2005, 2011 et 2015. Des dépérissements ont aussi été constatés en 2016 dans le haut Jura sur des sols calcaires très superficiels en versant sud, peut-être comme conséquence de la longue période de sécheresse de l'hiver 2015–2016. Les forestiers de cette région sont pessimistes quant à l'avenir du sapin dans cette zone d'ici 2100, du moins pour produire du gros bois, mais l'envisagent néanmoins comme espèce accompagnante du sous-bois pour augmenter la qualité des services écologiques attendus des forêts suisses.

Les données de l'IFN montrent qu'entre les inventaires 3 (2004/2006) et 4 (2009/2013), la plus forte mortalité du sapin par hectare et par an (en excluant les arbres abattus pour l'exploitation forestière) se situe bien sur le Plateau suisse (Abegg et al 2014). Ces dépérissements pourraient aussi être en partie expliqués par des attaques de scolytes curvidentés qui affectent particulièrement les vieux sapins déjà affaiblis en lisière et/ou en pleine exposition (Durrant-Gillmann et al 2014).

Apports des études expérimentales, transplantations et tests de provenances

Contrairement à d'autres espèces comme le hêtre ou l'épicéa, peu d'études expérimentales ont évalué la sensibilité du sapin à la sécheresse et aux températures plus chaudes. Une étude expérimentale a mesuré la capacité photosynthétique de jeunes sapins blancs après les avoir exposés à différentes températures (de 10 à 40 °C) dans des chambres cli-

matiques pendant 24 h. Les résultats ont montré une tolérance assez élevée du sapin face au stress thermique avec des dommages irréversibles sur les photosystèmes qui apparaissent seulement au-dessus de 47 °C (Robakowski et al 2002) et un optimum photosynthétique qui se situe autour de 20 °C contre seulement 15 °C pour l'épicéa (Gomez 2012). En revanche, de nombreux tests de provenance ont été menés au cours de la seconde moitié du XX^e siècle pour améliorer les performances de croissance et de qualité du fût du sapin et ainsi assurer une meilleure rentabilité. Le plus ancien test de provenance mené sur le sapin a été installé en Suisse au début du XX^e siècle et a montré peu de différenciation génétique entre les différentes provenances testées (Engler 1913). Dans les années 1990, un test de six provenances de sapins, dont quatre originaires de l'Italie, a été conduit dans le Jura près de Soleure à différentes altitudes. Ce test a montré une meilleure survie de la provenance du Valais central dans les cinq premières années, cette provenance ayant probablement une meilleure résistance à la sécheresse au stade juvénile (Commarmot 1997). Plus récemment, un test réunissant plus de 90 provenances issues de toutes les régions de Suisse n'a montré, encore une fois, que peu de différenciation génétique concernant la croissance et la phénologie de cette espèce en comparaison avec l'épicéa et le hêtre (Frank et al 2017). Une expérimentation avec des semis de quatre provenances originaires de trois pays (Italie, Suisse et France) a montré également peu de différenciation génétique entre les différentes populations de sapins blanc testées en réponse à la sécheresse et à la pollution de l'air malgré des conditions de précipitations très contrastées dans leur aire d'origine (Herzog & Rotach 1990). Les migrations et trajectoires des populations de sapin lors des dernières glaciations semblent cependant avoir engendré deux lignées de populations génétiquement distinctes en Europe centrale avec des sensibilités différentes aux variations climatiques. Ainsi, il semblerait que la lignée de populations de sapins blanc ayant évolué à partir des populations originaires des Balkans possède une plus large variété génétique que la lignée occidentale originaire d'Italie (dont les populations Suisses actuelles seraient issues), ce qui pourrait conférer une meilleure résilience face aux événements climatiques extrêmes (Bosela et al 2016) comme récemment confirmé en test de provenance (George et al 2015). Finalement, des plantations de sapin situées en marge chaude de son aire de répartition ont parfois été un succès montrant encore une fois la forte plasticité de cette espèce. Citons par exemple, la plantation de sapin datant de plus de 150 ans à Varramista en Toscane, à seulement 60 m d'altitude qui montre une régénération importante du sapin et peu de dépérissement (Pedrotti 1967, Tinner et al 2016).

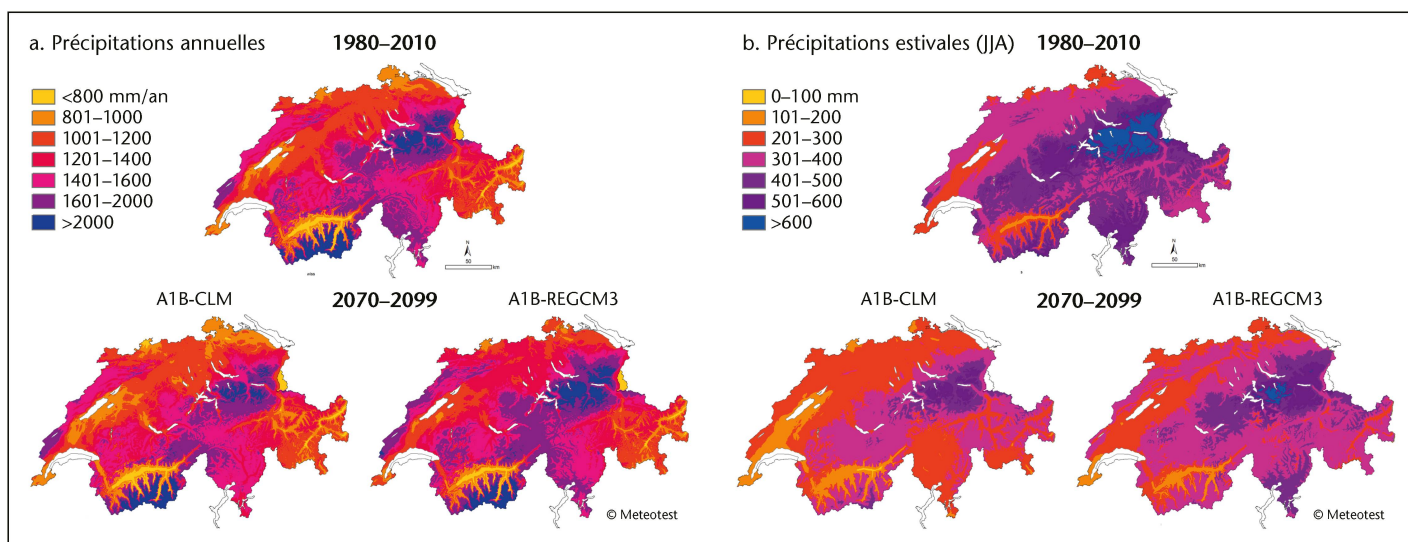


Fig. 5 Précipitations moyennes annuelles (a) et estivales (JJA, b) en Suisse pour la période 1980–2010 et prévues pour la période 2070–2099 selon deux modèles climatiques (le Common Land Model, CLM, et le Regional Climate Model version 3, RegCM3; source: Meteotest) utilisés selon le scénario A1B qui prévoit un réchauffement moyen de la surface de la Terre de 2.8 °C d’ici à 2100 (Parry 2007).

Potentiel du sapin blanc à faire face aux changements climatiques

Divergence entre les modèles de niche climatique et les études paléoécologiques

Les modèles de niche climatique basés sur une approche corrélative entre la répartition des espèces et les conditions climatiques actuelles prédisent une perte importante de la niche climatique du sapin d’ici la fin du siècle en Suisse et de manière plus générale en Europe, quel que soit le scénario climatique utilisé (Badeau et al 2007, Zimmermann et al 2016). Ces résultats ont été remis en question par des études paléoécologiques qui montrent que le sapin était plus abondant et présent qu’aujourd’hui jusqu’à 8000 BP, c’est-à-dire avant les perturbations importantes engendrées par les activités humaines, dans des régions où les températures estivales excédaient probablement de 5 °C les températures maximales atteintes dans les zones les plus chaudes de sa distribution actuelle (Tinner et al 2013). La présence actuelle du sapin vers les marges chaudes de sa répartition semble dès lors largement sous-représentée pour permettre une bonne calibration des modèles. Ainsi, lorsque les modèles projettent la niche climatique actuelle du sapin en Suisse, ils ne montrent pas de présence de cette espèce dans les vallées internes sèches du Valais et dans les régions de plus basses altitudes du Plateau où elle est pourtant répertoriée par l’Inventaire forestier national (Zimmermann et al 2016) et connue des forestiers. Les modélisateurs expliquent effectivement que la présence de cette espèce dans des conditions sèches et chaudes comme en Valais n’est pas assez fréquente comparée au reste des données pour apporter une contribution significative dans la calibration du modèle. L’ajout de données issues des études palynologiques pourrait pal-

lier ce problème et donner des projections plus probantes, néanmoins les résultats montrent toujours une perte de la niche climatique du sapin dans environ 40% de son aire de répartition actuelle d’ici 2100 (Maiorano et al 2013) basés sur le scénario modéré A1B publié par le Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) prévoyant un réchauffement moyen de la surface de la Terre de 2.8 °C d’ici à 2100 (Parry 2007). Toutefois, projetés sur la période actuelle, ces modèles ne parviennent toujours pas à simuler la présence du sapin dans les régions climatiques les plus chaudes de Suisse ou encore au sud de l’Italie. A l’opposé de ces résultats, les études paléoécologiques suggèrent que le sapin présente un potentiel élevé pour faire face au réchauffement climatique en Suisse, qui bénéficie d’une hygrométrie assez élevée dans la plupart des régions, à l’exception des vallées les plus continentales des Grisons et du Valais. Ces résultats sont également corroborés par des modèles récents de dynamique de la végétation, comme le modèle LandClim à condition d’implémenter un faible taux d’abrutissement dans les paramètres du modèle, c’est-à-dire de simuler une gestion très contrôlée du gibier (Henne et al 2013, Keller et al 2002), ce qui est néanmoins difficile à réaliser sur le terrain (Brang 2017).

Cependant, même si les études paléoécologiques suggèrent, à l’échelle de l’espèce, un fort potentiel du sapin à faire face au réchauffement climatique en cours, des incertitudes demeurent quant aux populations actuellement présentes en Suisse et plus généralement en Europe centrale. Il n’est par exemple pas exclu que le pool génétique des populations qui vivaient dans la partie méridionale de l’aire de répartition du sapin ait disparu au cours de l’Holocène sous la pression humaine. Ces populations pourraient avoir possédé des adaptations

génétiques permettant de faire face à un climat plus chaud et plus sec mais qui n'ont peut-être pas été conservées dans les populations actuelles puisque l'espèce a été contrainte par la pression humaine à se confiner dans des zones plus fraîches et plus humides (Liepelt et al 2010).

La disponibilité en eau jouera un rôle majeur

Les études dendroécologiques suggèrent que le sapin est plutôt tolérant aux températures chaudes, mais reste sensible aux sécheresses estivales prononcées, même s'il s'avère aussi résistant et résilient que le sapin Douglas et plus résistant que l'épicéa (Vitali et al 2017). L'analyse des données climatiques issues de la répartition actuelle du sapin et les modèles bioclimatiques actuels estiment que cette espèce a besoin de précipitations annuelles supérieures à 600–700 mm et supérieures à 90–120 mm pendant les trois mois d'été les plus chauds (juin, juillet, août) (Tinner et al 2013). Ces conditions climatiques sont à l'heure actuelle réunies dans la plupart des régions de Suisse, à l'exception de certaines zones du Valais (figure 5a et 5b), mais ces conditions pourraient ne plus être réunies dans certaines régions du sud-ouest du Plateau Suisse d'ici 2100 (notamment entre le lac Léman et le lac de Neuchâtel), en particulier concernant les précipitations estivales qui devraient diminuer de 5 à 25% selon le modèle considéré (Remund et al 2016 et figure 5b). Ainsi, hormis le sud-ouest du Plateau, les vallées continentales du Valais et des Grisons, ainsi que les vallées alpines fortement sujettes au foehn qui assèche l'air, une bonne performance du sapin pourrait être attendue dans pratiquement toutes les régions de Suisse (Henne et al 2015), à condition que la pression d'abrouissement et les feux de forêts soient suffisamment contrôlés pour ne pas mettre en péril la régénération de cette espèce. En revanche, les précipitations estivales pourraient progressivement manquer dans la région bâloise, les vallées internes sèches du Valais et des Grisons ainsi que dans une vaste zone de basse altitude située entre Genève et le lac de Bièvre (<200 mm selon le modèle Common Land Model, CLM et le scénario climatique A1B; figure 5b). Les forestiers du district de Neuchâtel, situé à la frontière de cette zone, constatent déjà des dépérissements de sapins adultes survenant après chaque année sèche. En outre, le type de sol et notamment sa capacité de rétention de l'eau jouera un rôle primordial pour atténuer les effets des sécheresses estivales sur la vitalité du sapin (Cailleret 2011) et plus généralement sur l'ensemble des essences forestières (Rohner et al 2016). Par exemple, un effet plus marqué pourrait être attendu sur le haut Jura, car les sols calcaires sont généralement très superficiels, avec une faible rétention d'eau (Scherler et al 2016), ce qui semble déjà être perçu par les forestiers de ces districts. A

l'inverse, l'effet négatif d'une sécheresse printanière ou estivale sur la croissance sera nettement atténué par des sols profonds et/ou en exposition nord (Wohlgemuth & Rigling 2014). Cependant, encore une fois le sapin a montré une capacité d'adaptation étonnante en climat sec sur roche comme au sud de Martigny en Valais, probablement grâce à ses racines qui peuvent se frayer un chemin en profondeur dans des failles pour aller trouver l'eau.

Recommandations sylvicoles pour promouvoir le sapin blanc dans les forêts suisses

Les pratiques sylvicoles et la gestion de la faune sauvage joueront un rôle-clé dans la promotion du sapin dans les forêts suisses. Le sapin est par exemple affecté négativement par des traitements sylvicoles qui provoquent des changements environnementaux trop abrupts comme ceux créés par de grandes trouées, voire des coupes rases. A l'inverse, un système de structure forestière irrégulière en utilisant une coupe sélective d'arbres individuels ou par groupes d'arbres permet une meilleure régénération et un meilleur établissement du sapin, car cette espèce peut dépasser les autres sous faible niveau lumineux, mais est vite concurrencée par des espèces comme le hêtre et l'épicéa en conditions de lumière plus vive (Grassi et al 2004). En outre, le sapin bénéficie d'une plus forte résilience à la sécheresse et d'une mortalité moindre lorsqu'il est mélangé avec des feuillus (Lebourgeois et al 2013). Cependant, même avec le système sylvicole le plus approprié, le recrutement du sapin pourrait continuer de faire défaut, si la pression d'abrouissement n'est pas suffisamment restreinte à l'aide d'une gestion stricte de la faune (Ficko et al 2016). Dans les zones à forte pression d'abrouissement, la seule mesure efficace pour sauver des sapins est leur protection contre le gibier (voir synthèse des méthodes possibles dans Kupferschmid & Brang 2010).

Pool génétique et autres espèces de sapins

Au-delà des interventions sylvicoles, une réflexion doit être entreprise pour promouvoir la diversité génétique existante de l'espèce (garant d'un potentiel d'adaptation plus élevé) et, alternativement, pour considérer l'introduction ou non d'autres espèces de sapins européens. Le sapin semble avoir un patrimoine génétique moins diversifié entre les populations que celui d'autres espèces forestières comme l'épicéa, mais qui lui permet d'être plus généraliste face aux aléas climatiques et par conséquent pourrait lui permettre de réduire les risques d'être mal adapté au climat futur (Frank et al 2017). Cependant, la résistance du sapin à ces événements climatiques extrêmes a sans doute été sous-estimée dans les populations existantes. Certaines populations marginales se trouvent actuellement dans des sites au climat beaucoup plus chaud et sec que les

limites climatiques communément admises dans la littérature. On pourrait citer par exemple les populations prospérant dans le sud de la France sur la face nord du Mont Ventoux à partir de 1000 m d'altitude ou encore en Toscane entre 400 m et 500 m d'altitude accompagnées par un cortège d'essences typiquement thermophiles comme le châtaignier (*Castanea sativa* Mill), le chêne vert (*Quercus ilex* L.), le charme houblon (*Ostrya carpinifolia* Scop.), la bruyère arborescente (*Erica arborea* L.) ou encore le genévrier (*Juniperus communis* L.; Tinner et al 2016). Ces populations marginales pourraient avoir un patrimoine génétique leur permettant de mieux résister à la sécheresse et devraient donc être considérées comme des sources de provenance potentielles pour des plantations futures (Roschanski et al 2016). De plus, même si la diversité génétique reste faible entre les populations de sapin, elle est plutôt élevée au sein des populations, même dans les zones marginales (Brousseau et al 2016), ce qui est un avantage pour mieux s'adapter aux changements climatiques. Cette diversité peut en outre être entretenue par des pratiques sylvicoles visant à favoriser la pollinisation sur de longues distances, par exemple en diminuant la densité d'arbres reproducteurs (voir synthèse des différentes méthodes dans Lefèvre et al 2014).

D'autres espèces de sapins méditerranéens pourraient également être considérées comme alternatives au sapin blanc en Suisse, comme par exemple *A. cephalonica* ou *A. borisii-regis* qui partagent des propriétés physiques du bois et des exigences écologiques proches de celles du sapin blanc, mais qui ont l'avantage d'être plus résistantes aux sécheresses estivales. Des tests de provenance utilisant ces espèces ont été menés dans le sud de la France à diverses altitudes et ont montré le potentiel de ces deux espèces à croître dans des climats à plus faible précipitation annuelle et à faire face à de longues périodes de sécheresse estivale (Fady 1993). Cette forte résilience à la sécheresse s'explique par leur précocité printanière et leur courte saison de croissance, finissant leur croissance annuelle dans les 30 à 45 jours suivant la sortie des jeunes aiguilles au printemps, c'est-à-dire bien avant les sécheresses estivales (Fady 1993). Cependant, la phénologie printanière très précoce de ces deux espèces les expose davantage aux risques de gel, risque qui demeure assez élevé en Suisse et qui a même augmenté au cours de la période de réchauffement des quatre dernières décennies au-dessus de 800 m (Vitasse et al 2018).

Conclusions

Les résultats concernant l'aptitude future du sapin blanc à prospérer dans les climats plus chauds et plus secs qu'aujourd'hui semblent apparemment

contradictoires, car ils proviennent d'études utilisant des approches très différentes. Cependant, cette synthèse montre qu'il semble possible de réconcilier ces résultats. Les modèles de niches statistiques, qui prévoient pour l'instant un fort déclin de la niche climatique du sapin, sont trop basés sur la répartition actuelle du sapin, qui a été fortement contractée en raison de l'activité humaine. Les études paléoécologiques remettent en question ces prévisions et les études dendroécologiques supportent ces dernières en démontrant que le sapin a une meilleure résistance et résilience par rapport à l'épicéa face aux sécheresses estivales.

En résumé, la synthèse des connaissances actuelles présentée ici montre qu'il paraît raisonnable de promouvoir le sapin qui est une espèce emblématique de la forêt suisse. Il a le potentiel de remplacer en partie l'épicéa en déclin, en dehors des zones les plus sèches que sont le sud-ouest du Plateau, la région bâloise et les vallées du Valais et des Grisons qui présentent une continentalité thermique élevée (Gubelmann et al 2016). Dans ces régions, ou dans certaines situations particulières comme en exposition sud ou dans les vallées fortement affectées par le foehn (faible humidité relative de l'air) ou encore sur des sols très superficiels et à très faible rétention d'eau, d'autres espèces plus résistantes à la sécheresse comme le chêne sessile semblent être plus appropriées d'ici la fin du siècle (Zimmermann et al 2016). Il reste cependant incertain, si le sapin ne souffrira pas plus dans le futur d'attaques d'insectes comme le scolyte curvidenté qui, à l'instar du bostryche typographe attaquant les épicéas, est favorisé par la hausse des températures et les sécheresses estivales, le premier facteur accélérant son cycle de développement et le deuxième augmentant la proportion d'arbres affaiblis. Une attitude prudente, visant à augmenter progressivement l'utilisation du sapin dans des forêts mixtes, est donc justifiée. Enfin, on ne connaît pas suffisamment aujourd'hui le potentiel des provenances de sapins originaires du sud, surtout des Balkans, qui pourraient présenter une diversité génétique élevée et une résistance particulière aux sécheresses. C'est pourquoi l'Institut de recherches WSL, dans le cadre d'un réseau de nouvelles plantations expérimentales de diverses essences prometteuses dans un climat plus chaud et plus sec, a l'intention d'examiner particulièrement de telles provenances pour le sapin. ■

Soumis: 1^{er} novembre 2017, accepté (avec comité de lecture): 18 janvier 2018

Remerciements

Cette recherche bibliographique a été financée par le programme de recherches «Forêt et changements climatiques» de l'Office fédéral de l'environnement et de l'Institut fédéral de recherches

WSL. Les auteurs remercient Jan Remund (entreprise Meteotest, Bern) pour les cartes de précipitations assemblées dans la figure 5.

Références

- AUSSENAC G (2002) Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change. *Ann For Sci* 59: 823–832.
- BADEAU V, DUPOUEY JL, CLUZEAU C, DRAPPIER J (2007) Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Rendez-vous techniques hors-série* 3: 62–66.
- BOSELA M, LUKAC M, CASTAGNERI D, SEDMÁK R, BIBER P ET AL (2018) Contrasting effects of environmental change on the radial growth of co-occurring beech and fir trees across Europe. *Sci Total Environ* 615: 1460–1469.
- BOSELA M, POPA I, GÖMÖRY D, LONGAUER R, TOBIN B ET AL (2016) Effects of post-glacial phylogeny and genetic diversity on the growth variability and climate sensitivity of European silver fir. *J Ecol* 104: 716–724.
- BRANG P (2017) Einfluss von Wildhuftieren auf den Wald seit Langem zu hoch – was tun? (Essay). *Schweiz Z Forstwes* 168: 195–199. doi: 10.3188/szf.2017.0195
- BROUSSEAU L, POSTOLACHE D, LASCoux M, DROUZAS AD, KÄLLMANN T ET AL (2016) Local adaptation in European firs assessed through extensive sampling across altitudinal gradients in southern Europe. *PLoS ONE* 11: e0158216.
- BÜNTGEN U, TEGEL W, KAPLAN JO, SCHAUB M, HAGEDORN F ET AL (2014) Placing unprecedented recent fir growth in a European-wide and Holocene-long context. *Front Ecol Environ* 12: 100–106.
- BÜRGI M, SCHULER A (2003) Driving forces of forest management – an analysis of regeneration practices in the forests of the Swiss Central Plateau during the 19th and 20th century. *For Ecol Manage* 176: 173–183.
- CAILLERET M (2011) Causes fonctionnelles du dépérissement et de la mortalité du sapin pectiné en Provence. Aix-en-Provence: Université Paul-Cézanne, Thèse de doctorat. 366 p.
- CAILLERET M, HENDRIK D (2011) Effects of climate on diameter growth of co-occurring *Fagus sylvatica* and *Abies alba* along an altitudinal gradient. *Trees-Struct Funct* 25: 265–276.
- CARCAILLET C, MULLER SD (2005) Holocene tree limit and distribution of *Abies alba* in the inner French Alps: anthropogenic or climatic changes? *Boreas* 34: 46–476.
- CARRER M, NOLA P, MOTTA R, URBINATI C (2010) Contrasting tree ring growth to climate responses of *Abies alba* toward the southern limit of its distribution area. *Oikos* 119: 1515–1525.
- CHAUCHARD S, BEILHE F, DENIS N, CARCAILLET C (2010) An increase in the upper tree-limit of silver fir (*Abies alba* Mill.) in the Alps since the mid-20th century: A land-use change phenomenon. *For Ecol Manage* 259: 1406–1415.
- COLOMBAROLI D, MARCHETTO A, TINNER W (2007) Long-term interactions between Mediterranean climate, vegetation and fire regime at Lago di Massaciuccoli (Tuscany, Italy). *J Ecol* 95: 755–770.
- COMMARMOT B (1997) Anbauversuch mit kalabrischen Tannen in verschiedenen Höhenlagen – erste Ergebnisse. *Schweiz Z Forstwes* 148: 353–365. doi: 10.5169/seals-700562
- CONEDERA M, COLOMBAROLI D, TINNER W, KREBS P, WHITLOCK C (2017) Insights about past forest dynamics as a tool for present and future forest management in Switzerland. *For Ecol Manage* 388: 100–112.
- DESPLANQUE C, ROLLAND C, MICHALET R (1998) Dendroclimatologie comparée du sapin et de l'épicéa dans les zones internes des vallées alpines nord-occidentales (France et Italie). *Ecologie* 29: 351–355.
- DURAND-GILLMANN M, CAILLERET M, BOIVIN T, NAGELEISEN LM, DAVI H (2014) Individual vulnerability factors of silver fir (*Abies alba* Mill.) to parasitism by two contrasting biotic agents: mistletoe (*Viscum album* L. ssp. *abietis*) and bark beetles (*Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae*) during a decline process. *Ann For Sci* 71: 659–673.
- EICHENSEER F (1997) Entwicklung der Tannenanteile in Ostbayern im 19. und 20. Jahrhundert. *Forst Holz* 52: 498–501.
- ELLING W, DITTMAR C, PFAFFELMOSER K, ROTZER T (2009) Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany. *For Ecol Manage* 257: 1175–87.
- ELLING W, HEBER U, POLLE A, BEESE F (2012) Schädigung von Waldökosystemen: Auswirkungen anthropogener Umweltveränderungen und Schutzmassnahmen. Heidelberg: Spektrum. 442 p.
- ENGESSER R, FORSTER B, LANDOLT W (2002) Frostschäden an Nadelbäumen im Winter 2001/2002 und deren Folgen. *Schweiz Z Forstwes* 153: 471–475. doi: 10.3188/szf.2002.0471
- ENGLER A (1913) Einfluss der Provenienz des Samens auf die Eigenschaften der forstlichen Holzgewächse. *Mitt Schweiz Centralanst Forstl Versuchswesen* 10: 190–386.
- ETTLINGER P (1976) Untersuchungen über den Erfolg früherer Fylschaufforstungen. *Beih Schweiz Z Forstwes* 58. 118 p.
- FADY B (1993) Caractéristiques écologiques et sylvicoles des sapins de Grèce dans leur aire naturelle et en plantation dans le sud de la France. Perspectives pour le reboisement en région méditerranéenne. *Rev For Fr* 45: 119–133.
- FICKO A, ROESSIGER J, BONCINA A (2016) Can the use of continuous cover forestry alone maintain silver fir (*Abies alba* Mill.) in central European mountain forests? *Forestry* 89: 412–421.
- FRANK A, SPERISEN C, HOWE GT, BRANG P, WALTHERT L ET AL (2017) Distinct genecological patterns in seedlings of Norway spruce and silver fir from a mountainous landscape. *Ecology* 98: 211–227.
- FREY HU (2003) Die Verbreitung und die waldbauliche Bedeutung der Weisstanne in den Zwischenalpen. Ein Beitrag für die waldbauliche Praxis. *Schweiz Z Forstwes* 154: 90–98. doi: 10.3188/szf.2003.0090
- GAZOL A, CAMARERO JJ, GUTIERREZ E, POPA I, ANDREU-HAYLES L ET AL (2015) Distinct effects of climate warming on populations of silver fir (*Abies alba*) across Europe. *J Biogeogr* 42: 1150–1162.
- GEORGE JP, SCHUELER S, KARANITSCH-ACKERL S, MAYER K, KLUMPP RT ET AL (2015) Inter- and intra-specific variation in drought sensitivity in *Abies* spec. and its relation to wood density and growth traits. *Agric For Meteorol* 214–215: 430–443.
- GOMEZ N (2012) Quel avenir pour le sapin et l'épicéa? Synthèse bibliographique sur l'autécologie et la vulnérabilité comparée du sapin et de l'épicéa dans le cadre des changements climatiques. *Rendez-vous techniques* 36–37: 3–8.
- GRASSI G, MINOTTA G, TONON G, BAGNARESI U (2004) Dynamics of Norway spruce and silver fir natural regeneration in a mixed stand under uneven-aged management. *Can J For Res* 34: 141–149.
- GUBELMANN P, HUBER B, FREHNER M, ZISCHG A, BURNAND J ET AL (2016) Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 1: Quantifizierung und Verschiebung der Höhenstufengrenzen sowie des Tannen- und Buchenareals in der Schweiz mit zwei Klimazukünften. Chur: Forstingenieurbüro Frehner. 233 p.
- GUICHERD P (1994) Water relations of European silver fir (*Abies alba* Mill.) in 2 natural stands in the French Alps subject to contrasting climatic conditions. *Ann Sci For* 51: 599–611.
- HENNE PD, ELKIN C, COLOMBAROLI D, SAMARTIN S, BUGMANN H, ET AL (2013) Impacts of changing climate and land use on vegetation dynamics in a Mediterranean ecosystem: insights from paleoecology and dynamic modeling. *Landsc Ecol* 28: 819–833.

- HENNE PD, ELKIN C, FRANKE J, COLOMBAROLI D, CALO C ET AL (2015) Reviving extinct Mediterranean forest communities may improve ecosystem potential in a warmer future. *Front Ecol Environ* 13: 356–362.
- HERZOG M, ROTACH P (1990) Trockenresistenz und Immissionshärte der Weisstanne (*Abies alba* Mill.): Frühstuntuntersuchungen mit vier Provenienzen. *Schweiz Z Forstwes* 141: 989–1010. doi: 10.5169/seals-703226
- KANDLER O, INNES JL (1995) Air pollution and forest decline in Central Europe. *Environ Pollut* 90: 171–180.
- KELLER F, LISCHKE H, MATHIS T, MÖHL A, WICK L ET AL (2002) Effects of climate, fire, and humans on forest dynamics: forest simulations compared to the palaeological record. *Ecol Model* 152: 109–127.
- KÖRNER C, ASSHOFF R, BIGNUCOLO O, HÄTTENSCHWILER S, KEEL SG ET AL (2005) Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science* 309: 1360–1362.
- KUPFERSCHMID A, BRANG P (2010) Notions de base pratiques: interactions entre le gibier et la forêt. In: OFEV, editor. *Forêt et gibier. Notions de base pratiques*. Berne: Office fédéral de l'environnement. pp. 9–39.
- KUPFERSCHMID AD, BUGMANN H (2013) Timing, light availability and vigour determine the response of *Abies alba* saplings to leader shoot browsing. *Eur J For Res* 132: 47–60.
- KUPFERSCHMID AD, WASEM U, BUGMANN H (2014) Light availability and ungulate browsing determine growth, height and mortality of *Abies alba* saplings. *For Ecol Manage* 318: 359–369.
- LEBOURGEOIS F, GOMEZ N, PINTO P, MERIAN P (2013) Mixed stands reduce *Abies alba* tree-ring sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. *For Ecol Manage* 303: 61–71.
- LEFEVRE F, BOIVIN T, BONTEMPS A, COURBET F, DAVI H ET AL (2014) Considering evolutionary processes in adaptive forestry. *Ann For Sci* 71: 723–739.
- LIEPELT S, MAYLAND-QUELLHORST E, LAHME M, ZIEGENHAGEN B (2010) Contrasting geographical patterns of ancient and modern genetic lineages in Mediterranean *Abies* species. *Plant Syst Evol* 284: 141–151.
- LINGG WA (1986) Ökologie der inneralpinen Weisstannenvorkommen (*Abies alba* Mill.) im Wallis (CH). *Mitt Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch* 62: 330–466.
- MACIAS M, ANDREU L, BOSCH O, CAMARERO JJ, GUTIERREZ E (2006) Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* mill.) water stress in its south-western distribution limit. *Clim Chang* 79: 289–313.
- MAIORANO L, CHEDDADI R, ZIMMERMANN NE, PELLISSIER L, PETITPIERRE B ET AL (2013) Building the niche through time: Using 13,000 years of data to predict the effects of climate change on three tree species in Europe. *Glob Ecol Biogeogr* 22: 302–317.
- MAKSYMOW JK (1950) Untersuchungen über den krummzähligen Weisstannenborkenkäfer *Ips curvidens* Germ. während seiner Massenvermehrung 1947–49 in der Schweiz. *Mitt Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch* 26: 499–581.
- MAURI A, DE RIGO D, CAUDULLO G (2016) *Abies alba* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: *European Atlas of Forest Tree Species*. Luxembourg: Publication Office of the European Union. pp. 48–49.
- MAZZA G, GALLUCCI V, MANETTI MC, URBINATI C (2014) Climate–growth relationships of silver fir (*Abies alba* Mill.) in marginal populations of Central Italy. *Dendrochronologia* 32: 181–190.
- NOURTIER M, CHANZY A, CAILLERET M, YINGGE X, HUC R, ET AL (2014) Transpiration of silver fir (*Abies alba* mill.) during and after drought in relation to soil properties in a Mediterranean mountain area. *Ann For Sci* 71: 683–695.
- OFEP (2005) *Rapport forestier 2005 – Faits et chiffres sur l'état de la forêt suisse*. Berne: Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. 154 p.
- PARRY M, CANZIANI O, PALUTIKOF JEAN, VAN DER LINDEN P, HANSON C, EDITORS (2007) *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge Univ Press. 987 p.
- PEDROTTI CC (1967) L'Abetina di Varramista (PISA). *Webbia* 22: 39–65.
- REMUND J, VON ARX G, GALLIEN L, REBETEZ M, HUBER B ET AL (2016) Changements climatiques en Suisse – définition de paramètres climatiques relatifs à la forêt. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. *Forêts et changements climatiques – éléments pour des stratégies d'adaptation*. Berne: Haupt. pp. 23–38.
- ROBAKOWSKI P, MONTPIED P, DREYER E (2002) Temperature response of photosynthesis of silver fir (*Abies alba* Mill.) seedlings. *Ann For Sci* 59: 163–170.
- ROHNER B, BRAUN S, WEBER P, THÜRIG E (2016) Croissance des arbres individuels: effets du climat. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. *Forêts et changements climatiques – éléments pour des stratégies d'adaptation*. Berne: Haupt. pp. 143–162.
- ROHNER B, THÜRIG E (2015) Entwicklung klimasensitiver Wachstumsfunktionen für das Szenariomodell «Massimo». *Schweiz Z Forstwes* 166: 389–398. doi: 10.3188/szf.2015.0389
- ROLLAND C, MICHALET R, DESPLANQUE C, PETETIN A, AIME S (1999) Ecological requirements of *Abies alba* in the French Alps derived from dendro-ecological analysis. *J Veg Sci* 10: 297–306.
- ROSHANSKI AM, CSILLERY K, LIEPELT S, ODDOU-MURATORIO S, ZIEGENHAGEN B, ET AL (2016) Evidence of divergent selection for drought and cold tolerance at landscape and local scales in *Abies alba* Mill. in the French Mediterranean Alps. *Mol Ecol* 25: 776–794.
- ROTHE A, DITTMAR C, ZANG C (2011) Tanne – vom Sorgenkind zum Hoffnungsträger. *LWF Wissen* 66: 59–63.
- RUOSCH M, SPAHNI R, JOOS F, HENNE PD, KNAAP WO ET AL (2016) Past and future evolution of *Abies alba* forests in Europe – comparison of a dynamic vegetation model with palaeo data and observations. *Glob Chang Biol* 22: 727–740.
- SAVILL P, WILSON SM, MASON B, JINKS R (2016) Silver firs (*Abies* spp) of Europe and the Near East: species, silviculture, and utilisation potential. *Q J For* 110: 16–27.
- SCHERLER M, REMUND J, WALTHER L (2016) Régime hydrique des forêts et accroissement de la sécheresse. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. *Forêts et changements climatiques – éléments pour des stratégies d'adaptation*. Berne: Haupt. pp. 41–62.
- SCHÜTT P, COWLING EB (1985) Waldsterben, a general decline of forests in central Europe: symptoms, development and possible causes. *Plant Dis* 69: 548–558.
- STOKES A, GHANI MA, SALIN F, DANJON F, JEANNIN H ET AL (2007) Root morphology and strain distribution during tree failure on mountain slopes. In: Stokes A, Spanos I, Norris JE, Cammeraat E, editors. *Eco- and ground bio-engineering: The use of vegetation to improve slope stability*. Dordrecht: Springer, *Developments in Plant and Soil Sciences* 103. pp. 165–173.
- TINNER W, COLOMBAROLI D, HEIRI O, HENNE PD, STEINACHER M ET AL (2013) The past ecology of *Abies alba* provides new perspectives on future responses of silver fir forests to global warming. *Ecol Monogr* 83: 419–439.
- TINNER W, CONEDERA M, BUGMANN H, COLOMBAROLI D, GOBET E ET AL (2016) Europäische Wälder unter wärmeren Klimabedingungen: neue Erkenntnisse aus Paläoökologie und dynamischer Vegetationsmodellierung. *AFZ/Der Wald* 71 (18): 45–49.
- TINNER W, HUBSCHMID PH, WEHRLI M, AMMAN B, CONEDERA M (1999) Long-term forest fire ecology and dynamics in southern Switzerland. *J Ecol* 87: 273–289.

- TINNER W, LOTTER AF (2006) Holocene expansions of *Fagus sylvatica* and *Abies alba* in Central Europe: where are we after eight decades of debate? *Quat Sci Rev* 25: 526–549.
- VAN DER MAATEN-THEUNISSEN M, KAHLE HP, VAN DER MAATEN E (2012) Drought sensitivity of Norway spruce is higher than that of silver fir along an altitudinal gradient in southwestern Germany. *Ann For Sci* 70: 185–193.
- VITALI V, BÜNTGEN U, BAUHAUS J (2017) Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Glob Change Biol* 23: 5108–5119.
- VITASSE Y, HOCH G, RANDIN CF, LENZ A, KOLLAS C ET AL (2012) Tree recruitment of European tree species at their current upper elevational limits in the Swiss Alps. *J Biogeogr* 39: 1439–1449.
- VITASSE Y, SCHNEIDER L, RIXEN C, CHRISTEN D, REBETEZ M (2018) Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agric For Meteorol* 248: 60–69.
- VRSKA T, ADAM D, HORT L, KOLAR T, JANIK D (2009) European beech (*Fagus sylvatica* L.) and silver fir (*Abies alba* Mill.) rotation in the Carpathians: a developmental cycle or a linear trend induced by man? *For Ecol Manage* 258: 347–356.
- WICK L, MÖHL A (2006) The mid-Holocene extinction of silver fir (*Abies alba*) in the Southern Alps: a consequence of forest fires? *Palaeobotanical records and forest simulations*. *Veg Hist Archaeobot* 15: 435.
- WOHLGEMUTH T, RIGLING A (2014) Kurz- und langfristige Auswirkungen des Klimas auf die Wälder im Churer Rheintal. Schlussbericht Projekt Bündner Wald im Klimawandel. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 81 p.
- ZANG C, HARTL-MEIER C, DITTMAR C, ROTHE A, MENZEL A (2014) Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. *Glob Chang Biol* 20: 3767–3779.
- ZIMMERMANN NE, SCHMATZ D, GALLIEN L, KÖRNER C, HUBER B, ET AL (2016) Répartition des espèces forestières et adéquation des stations. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. Forêts et changements climatiques – éléments pour des stratégies d'adaptation. Berne: Haupt. pp. 205–228.
- ZINGG A, BÜRGI A (2008) Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. *Schweiz Z Forstwes* 159: 352–361. doi: 10.3188/szf.2008.0352

Sources

- ABEGG M, BRÄNDLI U, CIOLDI F, FISCHER C, HEROLD-BONARDI A ET AL (2014) Quatrième inventaire forestier national suisse – tableaux et cartes des résultats de l'IFN 2009–2013 disponibles sur internet (IFN4b). Birmensdorf: Institut fédéral de recherches WSL. <https://doi.org/10.21258/1000005>
- EUFORGEN UB (2009) Distribution map of Silver fir (*Abies alba*). www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/PDF/Abies_alba.pdf (13.2.2018)

Welche Zukunft hat die Tanne in der Schweiz im Zuge des Klimawandels?

Die Waldfachleute vieler europäischer Länder suchen derzeit nach den Baumarten oder Herkünften, die am besten an das zukünftige Klima angepasst sind. Dieses wird wesentlich wärmer sein als das heutige und ausgeprägtere sommerliche Trockenperioden aufweisen. Während es für gewisse Baumarten als erwiesen gilt, dass der Klimawandel ihnen in den kommenden Jahrzehnten zunehmend zu schaffen macht, ist die Situation bei der Weisstanne (*Abies alba* Mill.) unklar, weil die publizierten Forschungsergebnisse zu ihrer Fähigkeit, die erwartete Klimaänderung zu ertragen, widersprüchlich sind. Einerseits lassen statistische Modelle, die sich auf die aktuelle Artverbreitung abstützen, einen starken Rückgang der Tanne bis Ende des Jahrhunderts erwarten. Andererseits zeigen paläoökologische Studien, dass die Tanne früher in einem wärmeren und wahrscheinlich trockeneren Klima als heute auftrat, was auf ein hohes Anpassungspotenzial an das künftige Klima hindeutet. Dieser Übersichtsartikel zeigt, dass die Tanne sich bei wärmeren Bedingungen entwickeln könnte, solange die Niederschläge ausreichend sind, was gemäss den Klimamodellen in der Mehrzahl der Schweizer Regionen bis Ende des Jahrhunderts der Fall sein dürfte. Zudem konnte mit Jahrringstudien belegt werden, dass die Tanne eine grössere Resistenz und Resilienz gegenüber Trockenperioden aufweist als die Fichte, was ihre Förderung im Rahmen der Waldbewirtschaftung nahelegt. Die grösste Bedrohung der Tanne ist heute zweifellos der Verbiss durch Wildhuftiere, der die Verjüngung verunmöglichen kann. Dieser muss reduziert werden, wenn der Tannenanteil in den Schweizer Mischwäldern erhöht werden soll.

What future for silver fir in Switzerland under ongoing climate change?

Foresters in many countries are currently seeking for the most suitable forest species or provenances for facing the future climate, which will be much warmer than today with more extreme summer droughts. While it is clear that some tree species will increasingly suffer from climate warming, the fate of silver fir (*Abies alba* Mill.) remains very uncertain because contradictory results have been published about the suitability of this species to cope with climate warming. On the one hand, species distribution models predict a strong decline of its climatic niche in the future. On the other hand, paleoecological studies reveal that this species was widely distributed under much warmer and probably drier climate, suggesting a high potential to face future climate warming. This literature survey shows that this species could actually grow under warmer conditions provided that precipitation remains sufficient, which seems to be the case for most regions of Switzerland according to climatic model predictions for the end of the century. In addition, dendroecological studies have shown a higher resistance and resilience of silver fir to drought compared to Norway spruce, suggesting that silver fir could be promoted by foresters. Nowadays, the greatest threat to silver fir is undoubtedly the browsing pressure by ungulates which can jeopardize its regeneration and must therefore be properly regulated to increase the proportion of silver fir in Swiss mixed forests.